

А.М. Михайленко, Д.Л. Шварц, С.О. Непряхин, Е.И. Устинова

Обобщенная модель сортовой двухвалковой прокатки. Геометрия очага деформации

Ключевые слова: сортовая прокатка, сортовые профили проката, калибровка прокатных валков, калибр, оптимизация калибровки валков, обобщенная модель прокатки, аналитическое описание калибра, геометрическая модель очага деформации.

В докладе, представленном авторами на предыдущем XI Конгрессе Прокатчиков [1], обоснована актуальность разработки обобщенной модели сортовой двухвалковой прокатки. Показано, что для оптимизации действующих и проектирования новых калибровок валков, модель должна обладать следующими свойствами:

- обеспечивать возможность оптимизации и проектирования калибровок любой сложности;
- уровень «простоты» модели должен обеспечить, с одной стороны, достаточно подробное описание геометрии очага деформации, а с другой – возможность реализации «быстрых» алгоритмов расчета формоизменения и энергосиловых параметров процесса прокатки с использованием ЭВМ.

В работе [1] представлено аналитическое описание калибра и подката произвольной формы. Предложено контур калибра и поперечного сечения прокатываемой полосы представлять определенной последовательностью отдельных участков описываемых единым уравнением квадратичной параболы

$$z = ay^2 + by + c. \quad (1)$$

Предложенное уравнение позволяет описать как криволинейные, так и прямолинейные (при $a=0$) участки калибра и заготовки. При таком универсальном аналитическом описании различные участки контуров калибра и полосы будут отличаться лишь своим набором коэффициентов a , b и c .

Такой подход является наилучшим для компьютерной реализации описания контуров, как заготовки, так и калибра, так как описание каждого из этих контуров может быть сведено к созданию и обработке одного двумерного массива чисел размерностью $5 \times N$, где N – количество участков контура, отличающихся своим набором коэффициентов a , b и c , а число 5 определено именно таким из-за необходимости хранения трех коэффициентов уравнения (1) и двух границ применимости этих коэффициентов вдоль оси ОУ y_1 и y_2 .

В настоящей статье представлена универсальная геометрическая модель очага деформации при прокатке заготовки произвольной формы в двухвалковом калибре, также произвольной формы (рис. 1).

ПОВЕРХНОСТИ ВАЛКОВ. Поверхность вала в месте расположения калибра (ручья) представляет собой поверхность образованную вращением соответственной части контура калибра $z = f(x, y)$ вокруг оси, совпадающей с осью вала и точно описывается уравнением

$$x^2 + (z - R)^2 = (R - f(y))^2, \quad (2)$$

где R – радиус вала в характерной точке.

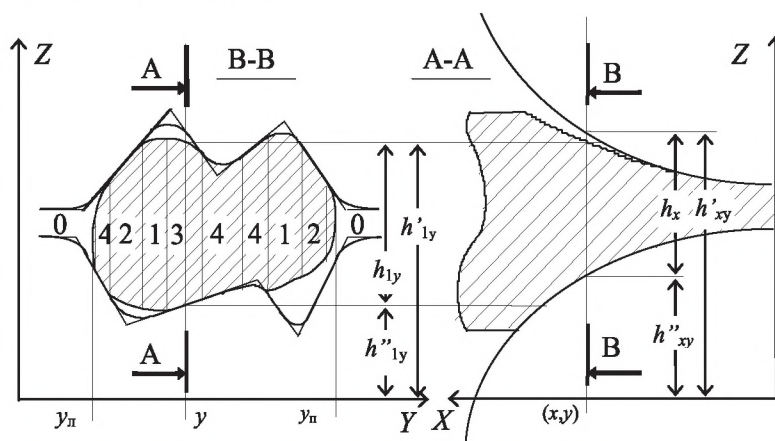


Рисунок 1. Схема очага деформации при прокатке профиля произвольной формы:
0, 1, ..., 4 – типы зон очага деформации

Введем понятие признака " p ", принимающего значение $+1$ для верхних частей полосы и заготовки, а также для верхнего валка (верхнего ручья), и значение -1 для нижних частей полосы и заготовки, нижнего валка (нижнего ручья). Кроме того, условимся здесь и в дальнейшем обозначать одним штрихом величины, относящиеся к верхним частям контуров поперечного сечения полосы, заготовки и калибра, а также к верхнему валку, а двумя штрихами – те же величины, но относящиеся к нижним частям. Величины, не обозначенные штрихами, будем полагать относящимися к обеим частям контуров или обеим валкам. С учетом сказанного, введем следующие обозначения:

- высота любого участка контура калибра (на координатной плоскости YOZ , т.е. при $x=0$)

$$h_{1y}(p) = \begin{cases} h'_{1y} & \text{при } p = +1 \\ h''_{1y} & \text{при } p = -1 \end{cases};$$

- высота любого участка контура заготовки (до входа в калибр)

$$h_0(p) = \begin{cases} h'_0 & \text{при } p = +1 \\ h''_0 & \text{при } p = -1 \end{cases};$$

- высота любого участка контура поперечного сечения прокатываемой полосы в очаге деформации

$$h_y(p) = \begin{cases} h'_y & \text{при } p = +1 \\ h''_y & \text{при } p = -1 \end{cases};$$

- высота некоторой точки валка, определенной координатами x, y

$$h_{xy}(p) = \begin{cases} h'_{xy} & \text{при } p = +1 \\ h''_{xy} & \text{при } p = -1 \end{cases};$$

- расстояние от осей соответствующих валков до оси OY

$$R(p) = \begin{cases} R' & \text{при } p = +1 \\ R'' & \text{при } p = -1 \end{cases};$$

С учетом принятых обозначений можно записать обобщенное уравнение поверхности валка

$$(h_{xy}(p) - pR(p))^2 + x^2 = (R(p) - ph_1(p))^2, \quad (3)$$

применимое как для верхнего (при $p=+1$), так и для нижнего (при $p=-1$) валков. Использование выражения (3) в дальнейших расчетах затруднено сложной формой его записи. Для упрощения, разложим это уравнение в степенной ряд. Специально проведенное исследование показало, что уже при использовании двух членов степенного ряда, можно получить вполне удовлетворительную аппроксимацию

$$h_{xy}(p) = h_1(p) + p \frac{0,5x^2}{R(p) - ph_1(p)}, \quad (4)$$

Высоту любой вертикали, находящейся в очаге деформации, имеющей координаты x, y и ограниченную сверху и снизу поверхностями валков, с достаточной точностью можно определить, используя выражение (4), следующим образом:

$$h_{xy} = h_{xy}(+1) - h_{xy}(-1). \quad (5)$$

ЗОНЫ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ. Анализируя известные работы, связанные с рассмотрением очага деформации при прокатке, можно выделить достаточно большое количество методов его разбиения на характерные зоны. Большинство авторов в качестве основных критериев разбиения выделяют два: во-первых, однотипность описания геометрических границ зоны и, во-вторых, однотипность контакта (или отсутствие контакта) полосы с валками. Используя эти два критерия при рассмотрении очага деформации в обобщенном случае прокатки, удастся получить однозначное разбиение его на характерные зоны следующим образом.

По первому критерию разобьем очаг деформации на зоны плоскими вертикальными сечениями, параллельными плоскости ZOХ и проходящими через точки сопряжения и выделенных участков контуров и поперечного сечения заготовки и калибра (см. рис.1). При этом каждой из зон будет приписан свой набор из 14-ти численных значений: два набора коэффициентов a , b и c в уравнении (1), описывающих геометрию верхней и нижней границ контура заготовки в этой зоне; два набора коэффициентов a , b и c в уравнении (1), описывающих геометрию верхней и нижней границ контура калибра; две границы применимости этих наборов коэффициентов вдоль оси ОУ y_1 и y_2 .

Используя второй критерий, каждой из таких зон можно приписать один из следующих типов (см. рис. 1):

- зона типа 0 – зона, в которой нет металла (свободные части и разъемы калибра);
- зона типа 1 – зона, в которой нет контакта полосы с валками;
- зона типа 2 – зона, в которой происходит контакт полосы только с верхним валком;
- зона типа 3 – зона, в которой происходит контакт полосы только с нижним валком;
- зона типа 4 – зона, в которой происходит контакт полосы одновременно и с верхним, и с нижним валками.

При таком делении, в зонах типа 4 полоса непосредственно обжимается валками ("обжимаемые зоны"), а в зонах типов 1-3 непосредственного обжатия полосы валками нет ("необжимаемые зоны").

По длине очага деформации (в направлении оси ОХ) зоны типов 2-4 имеют две границы, первой из которых является плоскость выхода металла из валков (в принятой системе координат, показанной на рисунке 1, это координатная плоскость ZOY), а второй – в общем случае, криволинейная поверхность, перпендикулярная координатной плоскости XOY и проходящая через линию первого контакта металла рассматриваемой зоны с валками.

Уравнение, описывающее проекцию линии первого контакта металла с валками на плоскость XOY, можно получить, решая относительно координаты X систему уравнений, описывающих поверхность полосы и валков

$$L(p) = \sqrt{s_1 y^4 + s_2 y^3 + s_3 y^2 + s_4 y + s_5}, \quad (6)$$

где $L(p)$ – длина проекции дуги контакта полосы с валками на ось ОХ для верхней (при $p=+1$) или нижней (при $p=-1$) частей полосы;

s_1, \dots, s_5 – коэффициенты, определяемые по выражениям:

$$\begin{aligned} s_1 &= 2a_1(a_1 - a_0), \\ s_2 &= 2(b_1(a_1 - a_0) + a_1(b_1 - b_0)), \\ s_3 &= 2(pR(p)(a_0 - a_1) + c_1(a_1 - a_0) + a_1(c_1 - c_0) + b_1(b_1 - b_0)), \\ s_4 &= 2(pR(p)(b_0 - b_1) + c_1(b_1 - b_0) + b_1(c_1 - c_0)), \\ s_5 &= 2(pR(p)(c_0 - c_1) + c_1(b_1 - b_0 - 1)), \end{aligned}$$

a_0 , b_0 и c_0 – коэффициенты уравнения (1), характеризующие контур поперечного сечения заготовки в рассматриваемой зоне; a_1 , b_1 и c_1 – коэффициенты уравнения (1), характеризующие контур калибра в этой зоне.

ОБЩАЯ КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ очага деформации для общего случая прокатки. Будем рассматривать наиболее общий случай формоизменения полосы произвольной формы под воздействием прокатных валков с калибром так же произвольной формы на этапе установившегося процесса прокатки [3]. При таких условиях, предсказать заранее характер формоизменения невозможно. Невозможно так же заранее произвести разбиение очага деформации на характерные зоны для их анализа. Как нам представляется, наилучшим решением в такой ситуации будет являться следующий концептуальный подход.

Выделим в прокатываемой полосе, до входа в очаг деформации, элементарный объем металла, ограниченный в направлении осей ОУ и ОZ геометрическими границами (поверхностью) полосы, а в направлении оси ОХ двумя вертикальными плоскостями, перпендикулярными этой оси и расположенными одна от другой на расстоянии dx . Если устремить dx к нулю, то получим сечение, которое назовем "выделенное поперечное сечение" или сокращенно ВПС. В дальнейшем, говоря о ВПС, будем подразумевать не площадь, а объем металла $\omega_x dx$, где ω_x – площадь ВПС. Такой подход имеет общие черты с известным инженерным решением плоской задачи прокатки А.И. Целикова [4], но есть и отличия – рассматривается объемное течение металла в очаге деформации, создаваемом калибром произвольной формы.

Для построения модели очага деформации и анализа процесса формоизменения металла проследим, как будет изменяться форма и размеры ВПС при его прохождении вдоль очага деформации, начиная от

момента первого контакта с валками и вплоть до выхода из валков. При этом текущее положение ВПС в очаге деформации будем характеризовать его координатой X .

В соответствии с оговоренным выше разбиением очага деформации на зоны по признаку характерных участков верхней и нижней границ и их классификацией по признаку контакта с валками, разобьем и ВПС на такие же зоны. Под зоной ВПС будем подразумевать часть ВПС, целиком принадлежащую соответствующей зоне очага деформации. Примем, что типы зон ВПС будут соответствовать типам зон очага деформации.

До входа в очаг деформации все зоны ВПС, имеют тип 1 (нет контакта ни с одним из валков). При входе ВПС в очаг деформации возникает контакт отдельных его зон с валками, причем, в общем случае, не одновременный. Это будет приводить к изменению типа зон ВПС, вступивших в контакт с валками. Воздействие валков приводит к перемещению границ зон ВПС в координатном пространстве, а для зон контакта с валками – и к искажению формы границ. Это может быть отражено за счет изменения значений коэффициентов в уравнениях, описывающих границы этих зон в процессе перемещения ВПС вдоль оси OX . А учитывая возможную разновременность наступления контакта металла с валками по ширине в отдельной зоне, может происходить увеличение количества зон. Но, может происходить и уменьшение их количества за счет слияния зон, имеющих, во-первых, одинаковый набор коэффициентов уравнения (1), описывающих их границы и, во-вторых, одинаковый признак контакта металла с валками (одинаковый тип зоны).

ЧАСТНЫЕ ПРОЦЕССЫ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ. Для описания преобразования ВПС под воздействие прокатных валков, будем использовать пять "основных частных процессов формоизменения", проходящих в геометрическом очаге деформации, совокупное действие которых полностью и определяет все формоизменение полосы.

Смещение – будем понимать под этим термином процессы перемещения ВПС вдоль осей OZ (вертикальное смещение) и OY (горизонтальное смещение) до начала его обжатия и такое же перемещение его отдельных необжимаемых зон в процессе входа и прохождения геометрического очага деформации (при изменении координаты X).

Поворот – под этим термином будем понимать процесс поворота ВПС или только отдельных его зон вокруг некоторого мгновенного центра вращения.

Смещение и поворот, фактически, описывают процесс захвата ВПС или его частей валками и наблюдаются лишь в необжимаемых зонах. Эти процессы происходят или за счет непосредственного воздействия валков (зоны типов 2 и 3) или (для зон типа 1) за счет соответствующего перемещения соседних зон ВПС. Примем характер перемещения зон ВПС в процессе захвата соответствующим перемещению и вращению твердого тела.

Изгиб – этим термином будем обозначать поперечный пластический изгиб ВПС в плоскости, параллельной координатной плоскости YOZ (в плоскости ВПС). Пластический изгиб сечения прокатываемой полосы широко применяется при прокатке фасонных профилей, например, при использовании развернутой калибровки уголков или швеллеров.

Обжатие – смещение валками части металла ВПС по высоте в зонах типа 4 (обжимаемые зоны), приводящее к уменьшению высоты этих зон. Металл, смещаемый по высоте (обжимаемый металл) частично перемещается в длину (вдоль оси OX), обуславливая вытяжку и/или в ширину (вдоль оси OY), обуславливая уширение.

Вытяжка – уменьшение площади ВПС, связанное с его обжатием валками и перемещением части этого металла в направлении оси OX , такое перемещение приводит к возникновению продольной (вдоль оси OX) скорости течения металла и увеличению длины раската.

Конечно, в очаге деформации присутствуют и другие частные процессы, такие например, как уширение, утяжка и др., но они физически связаны с перечисленными основными частными процессами, и при заданных геометрии полосы и калибра, однозначно определяются ими, хотя, в принципе, могут быть использованы и взамен них.

Для аналитического описания геометрической деформационной модели всего процесса прокатки необходимо: 1) выявить и аналитически описать закономерности протекания указанных пяти частных процессов формоизменения; 2) установить и описать связи этих частных процессов, отражающие их взаимное влияние при одновременном воздействии на ВПС:

1) Описание формоизменения ВПС под воздействием каждого из выделенных частных процессов прокатки может быть произведено с использованием совершенно конкретных алгоритмов, названных нами "**механизмы формоизменения**" ВПС. Всего выделено пять таких механизмов:

механизм № 1 – смещение зон ВПС;

механизм № 2 – жесткий поворот зон ВПС;

механизм № 3 – пластический изгиб зон ВПС;

механизм № 4 – обжатие зон ВПС без вытяжки;

механизм № 5 – обжатие зон ВПС с вытяжкой.

Суть и описание каждого из механизмов выходят за рамки настоящей статьи и будут изложены в последующих публикациях.

2) Оказалось, что в очаге деформации можно выделить лишь несколько типов взаимодействия (взаимосвязи) основных частных процессов прокатки, причем, каждое такое взаимодействие происходит на определенной стадии прохождения ВПС через очаг деформации и последовательность их появления постоянна. Назовем такие отдельные стадии "**этапы формоизменения ВПС**" в очаге деформации. Весь процесс прокатки можно представить как однозначно определенную последовательность протекания определенных этапов формоизменения ВПС с присущими каждому этапу взаимными связями указанных выше основных частных процессов прокатки. Установлено, что одни и те же механизмы могут действовать на различных этапах формоизменения, но каждому этапу характерен свой, индивидуальный набор механизмов.

ЭТАПЫ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ВПС В ГЕОМЕТРИЧЕСКОМ ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ. Анализ процесса прокатки по существующим калибровкам прокатных валков, предназначенным для получения сортовых профилей с применением двухвалковых клетей [1-2, 5-7 и др.], а также рекомендаций по построению калибров [1, 6-8 и др.] применительно к отдельно взятой паре полоса-прокатные валки, позволяет выделить семь наиболее общих этапов формоизменения ВПС в очаге деформации, схематично показанных рис. 2 для произвольного случая прокатки.

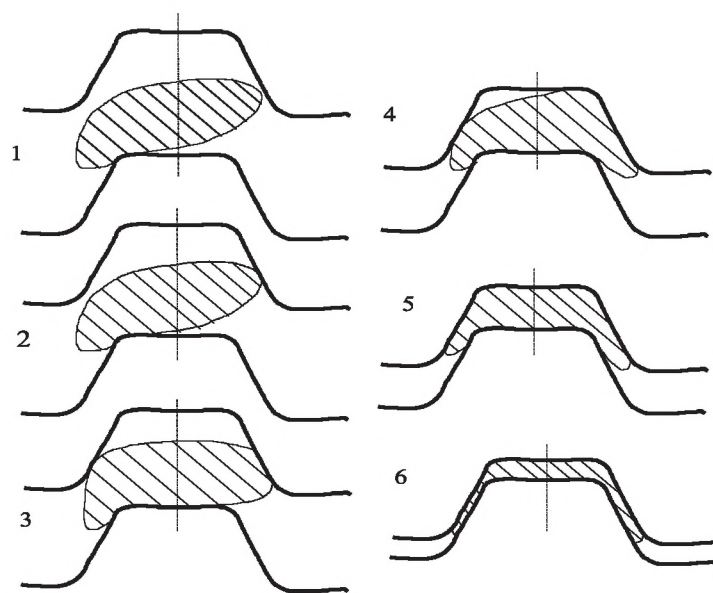


Рисунок 2. Этапы формоизменения ВПС в очаге деформации: 1,2,...,6 – номера этапов

ЭТАП 1. Жесткое смещение ВПС одним из валков. В общем случае настройки привалковой арматуры полоса при входе в валки встречается с начала с одним из них, а затем уже и с другим, как это показано на (см. рисунок 2, этап 1). В результате воздействия первого валка на полосу, она отклоняется от первоначального направления движения, и ВПС начинает смещаться вдоль поверхности этого валка, оставаясь "жестким телом". Этап 1 начинается с момента контакта ВПС с одним из валков (при $x = x_{н1}$) и заканчивается в момент начала контакта с другим валком (при $x = x_{к1}$).

Для определения значения $x_{н1}$ необходимо определить максимальное значение длины проекции дуги контакта задаваемой полосы с валками $L(p)$, что приводит для каждой зоны ВПС к необходимости решения уравнения

$$\frac{4s_1y^3 + 3s_2y^2 + 2s_3y + s_4}{2\sqrt{s_1y^4 + s_2y^3 + s_3y^2 + s_4y + s_5}} = 0, \quad (7)$$

в котором коэффициенты s_1, \dots, s_5 определяются также как, и в выражении (6), причем отдельно для верхнего и нижнего валков.

Рассчитав по уравнению (7) массив значений y_i для каждой зоны i отдельно для верхнего и нижнего валков, найдем по выражению (6) массив соответствующих значений x_{ni} , а затем используя условие $x_{nI} = \max(x_{ni})$, найдем действительное значение координаты X точки первой встречи ВПС с валками, определив тем самым момент начала действия первого этапа формоизменения и процесса прокатки в целом.

При движении ВПС из положения x_{nI} в положение x_{KI} проекция его контура на плоскость YOZ будет перемещаться путем параллельного переноса в направлении осей OZ и OY на величины, определяемые смещением точки контакта ВПС и валка, воздействующего на ВПС на этом участке. На этом этапе действует лишь механизм № 1, определяющий частный процесс смещения ВПС.

ЭТАП 2. Жесткий поворот ВПС. В общем случае прокатки, в конце первого этапа формоизменения, точки касания полосы с верхним и нижним валками имеют различные координаты Y (см. рис.2, этап 2). При этом со стороны валков на ВПС начинает действовать пара сил, заставляющая его поворачиваться вокруг некоторого мгновенного центра вращения как жесткое тело. По мере продвижения ВПС в направлении прокатки, оно будет поворачиваться на все больший угол вплоть до возникновения ситуации, когда его дальнейший жесткий поворот становится невозможным (см. рис.2, этап 3). Описание геометрических преобразований границ ВПС на этом этапе целиком производится с помощью механизма № 2.

Этап 2 заканчивается при появлении третьей точки (или участка) касания ВПС с валками. С этого момента начинается образование как минимум двух зон типа 2 и одной зоны типа 3, находящейся между ними, либо как минимум двух зон типа 3 и одной зоны типа 2, находящейся между первыми двумя зонами. При этом зоны типов 2 и 3 разделены зонами типа 1.

ЭТАП 3. Поперечный пластический изгиб ВПС. На третьем этапе формоизменения (см. рис. 2, этап 3) на ВПС со стороны валков начинают действовать силы, заставляющие его изгибаться в плоскости ВПС огибая центральный участок одного из валков. При этом появляются одна или несколько зон пластического изгиба ВПС и начинается процесс непосредственного формоизменения ВПС, связанный с пластической деформацией металла в валках. На этом этапе формоизменения часть зон перемещается вдоль некоторого вектора, оставаясь параллельными самим себе, другая часть зон поворачивается вокруг некоторого мгновенного центра вращения (который в свою очередь также перемещается), а часть зон изменяет свой контур вследствие изгиба. Таким образом, на третьем этапе имеем взаимодействие трех частных процессов прокатки, а именно – смещение, поворот и поперечный изгиб ВПС и для и описания необходимо применить три механизма формоизменения №1 - №3.

Этап 3 может быть завершен в момент полного огибания поверхности одного из валков ВПС. Однако, в большинстве случаев, еще до общего окончания изгиба ВПС, в отдельных его местах уже может начаться обжатие валками.

ЭТАП 4. Пластический изгиб и обжатие ВПС без вытяжки. На этом этапе деформирования (см. рис.2, этап 4) характер формоизменения ВПС, связанный с процессами изгиба, аналогичен тому, что наблюдается на этапе 3. Однако, чаще всего, дополнительно, возникают малые по ширине участки одновременного контакта полосы и с верхним и нижним валками, имеющие одинаковые координаты Y , т.е. появляются зоны типа 4. Возникновение этих участков (зон) обуславливает процесс обжатия полосы валками, который начинает влиять на процесс пластического изгиба ВПС. Особенность этого влияния связана с тем, что процесс обжатия ВПС вызывает общее уширение полосы и изменение мест контакта ВПС с валками.

Известно, что с увеличением неравномерности деформации по ширине полосы возрастает ее уширение и соответственно уменьшается вытяжка [9-11 и др.]. Такая ситуация довольно часто имеет место в случае прокатки профилей сложной формы и уменьшение вытяжки связывают со сдерживающим влиянием на вытяжку необжимаемых зон. Действительно, если площадь обжимаемых зон мала по сравнению со всей площадью ВПС, то мощности, подводимой валками через малые обжимаемые зоны может оказаться недостаточно для вытяжки всего поперечного сечения полосы. В результате, металл, смещаемый валками по высоте вынужден будет перемещаться в поперечном направлении. Очевидно, что снижение вытяжки и увеличение уширения должны проявляться, прежде всего, в начале очага деформации, где вследствие неодновременного захвата ВПС валками, неравномерность обжатия по ширине наибольшая.

При исследовании прокатки в вытяжных калибрах, в работах [8-13] теоретически обоснованно и экспериментально подтверждено наличие в начале очага деформации участка, на котором полностью отсутствует вытяжка полосы несмотря на наличие обжимаемых зон. Сделан вывод [13] о том, что вытяжка начинается лишь с того момента, когда обжимаемая площадь поперечного сечения достигает 67% от всей площади поперечного сечения полосы. Распространим вывод о наличии некоторого порогового значения начала вытяжки на общий случай сортовой двухвалковой прокатки. В качестве критерия для определения момента начала вытяжки (момента завершения действия четвертого этапа) выберем, также, как и в работах [8-13], отношение суммарной площади обжимаемых зон ВПС (зон типа 4) ко всей площади ВПС.

Однако, учитывая широкий спектр возможных влияний на процесс прокатки различных факторов, определяемых геометрией очага деформации произвольной формы, по-видимому, правильнее не фиксировать предельную величину указанного критерия, а определить его значение в процессе решения задачи. Такой подход несколько усложнит общее решение задачи, однако точность получаемых результатов может оказаться значительно выше в связи с более тонким учетом характера формоизменения. Введение условия отсутствия вытяжки существенно сказывается на составляющие полной мощности процесса прокатки, уменьшая мощность внутренних сил и увеличивая мощность сил трения прокатываемого металла о валки при увеличенном поперечном его перемещении.

С учетом сказанного, на четвертом этапе формоизменения можно выделить четыре тесно связанных частных процесса прокатки полосы, происходящих в разных зонах ВПС – смещение, поворот, изгиб и обжатие, которые можно описать с использованием механизмов №1 - №4. Их взаимная связь очевидна, так как обжатие отдельных зон ВПС валками вызывает уширение всех зон ВПС, а, следовательно, изменяет положение точек контакта металла с валками, определяющих действие частного процесса изгиба, что, в свою очередь, приводит к изменениям в процессе захвата отдельных зон ВПС.

ЭТАП 5. Пластический изгиб и обжатие ВПС с вытяжкой. На этапе 5 формоизменения ВПС (см. рис. 2, этап 5) реализуются все пять частных процессов прокатки (захват, изгиб, обжатие и вытяжка), причем вытяжка будет наблюдаться во всех зонах. Зоны типа 4 будут обжиматься, зоны типа 1-3 будут перемещаться в поперечном направлении вследствие общего уширения ВПС, часть зон типов 1-3 будет деформироваться вследствие изгиба ВПС, а другая часть этих зон испытает на себе действие процессов захвата полосы валками, в результате чего возможно их смещение вверх или вниз и поворот. Для описания поведения различных зон ВПС на этом этапе необходимо применение всех пяти механизмов формоизменения.

ЭТАП 6. Обжатие ВПС с вытяжкой. На завершающей стадии прокатки (см. рис. 2, этап 6), как правило, происходит обжатие практически всех элементов (зон) профиля, за исключением небольших боковых зон типов 1-3, подверженных действию процессов захвата. Наблюдается общая вытяжка всех зон ВПС и их поперечное перемещение, а также вертикальное смещение и, возможно, поворот зон типов 1-3. Действуют механизмы №1, №2 и №5. Этап заканчивается при выходе ВПС из валков, то есть в момент прохождения ВПС через плоскость YOZ (см. рисунок 1).

ЭТАП 4а. Обжатие ВПС без вытяжки. Кроме выделенных выше шести этапов формоизменения ВПС, можно выделить еще один этап, являющийся разновидностью этапа 4. На этом этапе происходит обжатие ВПС на небольшом по ширине участке, причем суммарная площадь обжимаемых зон меньше критической, вследствие чего нет вытяжки. Но в отличие от этапа 4, нет условий для изгиба необжимаемых элементов профиля. В результате, формоизменения ВПС на этапе 4а определяется частными процессами обжатия в зонах типа 4 и, как следствие, уширения металла в этих зонах, а также частным процессом смещения зон других типов.

Выше перечислен максимальный набор этапов формоизменения, который может наблюдаться, прежде всего при прокатке сортовой двухвалковой сложных профилей проката. Для отдельных случаев ВПС не обязательно будет проходить через все выделенные выше этапы формоизменения. Так, например, при определенной настройке вводной арматуры может отсутствовать этап 1 (полоса одновременно касается сразу обоих валков), а при удачном сочетании положения задаваемой полосы и калибра – этап 2 и т.д.

При анализе прокатки полосы с конкретной формой поперечного сечения в конкретном калибре достаточно "собрать" весь процесс прокатки из соответствующей последовательности отдельных этапов. Математическая модель каждого этапа составляется из заранее известных математических моделей отдельных механизмов, причем их состав и порядок взаимодействия также заранее определены. "Собранная" таким образом полная математическая модель процесса прокатки может быть реализована в виде алгоритмов расчета формоизменения металла, пригодных для реализации на ЭВМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью оптимизации калибровки сортопрокатных валков необходимо использование универсальных, "быстрых" и достаточно точных методов расчета параметров прокатки. Универсальность метода расчета может быть обеспечена посредством применения единого алгоритма расчета, не зависящего от размеров и формы калибра и прокатываемой в нем заготовки. Разработан единый универсальный и достаточно простой способ кусочного описания геометрии контуров заготовки и калибра при помощи частного уравнения квадратичной параболы и индивидуального набора числовых коэффициентов этого уравнения. Для упрощения описания поверхности калиброванного валка в области расположения прокатного ручья предложено использовать степенной ряд, хорошо аппроксимирующий истинное уравнение поверхности валка уже при использовании двух первых членов ряда.

Геометрическая и деформационная модель очага деформации строится на основе использования концепции "выделенного поперечного сечения" (ВПС), как объема металла прокатываемой полосы, ограниченного двумя плоскими поперечными сечениями, находящимися на бесконечно малом расстоянии друг от друга. Весь сложный процесс прокатки представлен как совокупность более простых, взаимосвязанных "частных процессов", которым подвержены отдельные зоны ВПС (смещение, поворот, изгиб, обжатие, вытяжка). Каждый из этих процессов может быть описан при помощи отдельных универсальных алгоритмов, определяющих "механизмы формоизменения зон ВПС". Процесс формоизменения ВПС при прохождении сквозь очаг деформации представлен как однозначная последовательность протекания определенного набора этапов формоизменения. Установлено, что для каждого из этапов характерен свой индивидуальный набор механизмов формоизменения зон ВПС и индивидуальный порядок их взаимного влияния. Для составления полной математической модели конкретного процесса прокатки достаточно проследить характер воздействия валков на отдельные зоны ВПС в процессе его прохождения сквозь очаг деформации и "собрать" модель из заранее сформированных механизмов формоизменения, порядок взаимодействия которых заранее определен последовательно наступающими этапами формоизменения ВПС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайленко А.М., Смирнов В.К. Деформации и усилия в калибрах простой формы / В.К. Смирнов, В.А. Шилов, К.И. Литвинов // М.: Металлургия. 1982. – 144 с.
2. Тарновский И.Я. Элементы теории прокатки сложных профилей / И.Я. Тарновский, А.Н. Скороходов, Б.М. Илюкович // М.: Металлургия. 1972. – 352 с.
3. Целиков А.И. Теория расчета усилий в прокатных станах / А.И. Целиков. // М.: Металлургия. 1962. – 494 с.
4. Смирнов В.К. Калибровка прокатных валков / В.К. Смирнов, В.А. Шилов, Ю.В. Инатович // М.: Теплотехник. 2010. – 490 с.
5. Бахтинов Б.П. Калибровка прокатных валков / Б.П. Бахтинов, М.М. Штернов. // М.: Металлургиздат. 1953. – 783 с.
6. Есипов В.Д. Прокатка специальных профилей сложной формы / В.Д. Есипов, Б.М. Илюкович, Ю.С. Чернобривенко, И.Н. Киреев // Киев: Техника. 1985. – 192 с.
7. Писаренко Ф.А. Исследование характера влияния необжимаемых элементов на энергосиловые параметры процесса прокатки тавровых профилей / Ф.А. Писаренко, Е.С. Дмитриев, Ю.Т. Шевченко, К.А. Ващенко // Деп. в УкрНИТИ. – 09.10.1984. № 1667 Ук-84. – 7 с.
8. Чигринский В.В. Исследование формоизменения в условиях неравномерного обжатия по ширине / В.В. Чигринский, В.И. Деревянко // Известия вузов. Черная металлургия. – 1983. № 1. С. 76-82.
9. Капелюшный В.П. Разработка, исследование и внедрение технологии прокатки фасонных профилей из заготовки круглого сечения: дис. ... канд. техн. наук. – Днепропетровск, Днепропетровский индустр. ин-т, 1988. – 207 с.
10. Тулупов С.А. К вопросу о поперечной деформации в очаге деформации при прокатке в вытяжных калибрах / С.А. Тулупов, Л.М. Цун, П.Н. Газеев // Деп. в Черметинформации – 26.09.86. № 6317-ЧМ. – 18 с.
11. Тулупов С.А. Особенности продольного течения металла в очаге деформации при прокатке в вытяжных калибрах / С.А. Тулупов, Л.М. Цун, В.А. Курдюмова // Деп. в Черметинформации 26.01.87. № 3487-ЧМ. – 15 с.
12. Цун Л.М. Механизм формоизменения металла в вытяжных калибрах и его применение для анализа и совершенствования калибровок валков сортовых станов: дис. ... канд. техн. наук. – Магнитогорск, Магнитогорский горно-металлург. ин-т, 1988. – 222 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МИХАЙЛЕНКО Аркадий Михайлович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Обработка металлов давлением» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
E-mail: am_plus@mail.ru

ШВАРЦ Данил Леонидович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Обработка металлов давлением» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
E-mail: d.l.shvartc@urfu.ru

НЕПРЯХИН Сергей Олегович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Обработка металлов давлением» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
E-mail: s.o.nepriakhin@urfu.ru

УСТИНОВА Екатерина Ильинична, аспирант кафедры «Обработка металлов давлением» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
E-mail: e.i.ustinova@urfu.ru